

Излучение плоской электромагнитной волны произвольной поляризации на синусоидальной границе водной поверхности

А.Б. Селунский, А.В. Кузьмин, Н.Ю. Комарова

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: alexendersel@mail.ru*

Дистанционные аэрокосмические методы сегодня играют определяющую роль в исследованиях Мирового океана. В свою очередь, микроволновые радиометрические измерения в дистанционном зондировании океана занимают одно из ведущих мест. С помощью микроволновой радиометрии удастся определять такие важнейшие параметры системы океан – атмосфера, как температура поверхности океана, скорость и направление приповерхностного ветра, интегральные параметры влажности и содержания водяного пара в атмосфере и т.п. Значительные усилия исследователей направлены в последние годы на разработку методов определения солёности поверхностного слоя океана. Все это требует постоянного исследования физических механизмов формирования поляризационных характеристик собственного и рассеянного микроволнового излучения шероховатой поверхностью.

В работе развивается теория взаимодействия плоско-поляризованной монохроматической электромагнитной волны с синусоидальной морской поверхностью. Получено точное решение волнового уравнения на синусоидальной границе вода-воздух для произвольной поляризации. Граничные условия на периодической поверхности разлагаются в ряды Фурье по пространственным гармоникам. Это приводит к бесконечномерной системе линейных уравнений, которая решается с любой выбранной степенью точности в силу ее диагональной структуры. На основе полученного решения проведены расчеты коэффициента поглощения, излучения и радиояркостной температуры морской поверхности от различных параметров. Показаны резонансные особенности в коэффициентах излучения и поглощения. Максимальные эффекты связаны, как это и ожидалось, с вертикальной поляризацией излучения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, микроволновая радиометрия, радиометры, теория рассеяния электромагнитных волн, коэффициент поглощения, коэффициент излучения, критические явления

Введение

Специализированные спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) заняли в наше время важное место в ряду инструментов исследования окружающей среды и глобального мониторинга. Среди установленной на таких спутниках аппаратуры особо важную роль в исследовании океана и атмосферы играют микроволновые радиометры, использование которых связано с тем, что радиояркостная температура подстилающей поверхности является высокоинформативным параметром. Радиояркостная температура морской поверхности зависит от коэффициента излучения и температуры воды. Коэффициент излучения определяется диэлектрическими свойствами воды, в частности солёностью, формой поверхности и наличием пены на поверхности моря. В нештормовых условиях влияние пены мало и изменения радиояркостной температуры вызываются, главным образом, поверхностными волнами различных масштабов. Это обстоятельство является физической основой использования микроволновых радиометров для исследования поверхностного волнения и его модуляции различными процессами в деятельном слое океана и взаимодействием океана и атмосферы. Радиометрические измерения, в силу присущих им особенностей, полезным образом дополняют радиолокационные и оптические методы наблюдения.

Связь радиояркостной температуры с параметрами поверхностного волнения является основой для решения таких задач, как определение скорости и направления приповерх-

ностного ветра, определение статистических характеристик волнения, индикация и измерения поверхностных проявлений внутренних волн, диагностика загрязнений на морской поверхности. Прецизионные измерения температуры воды в поверхностном скин-слое имеют важнейшее значение для исследования взаимодействия океана и атмосферы, задач океанологии, разработке новых подходов для восстановления потоков тепла на поверхности океана. Решение всех этих задач требует адекватных моделей физических механизмов формирования поляризационных характеристик собственного и рассеянного микроволнового излучения шероховатой поверхностью.

В предлагаемой работе развивается теория взаимодействия плоско-поляризованной монохроматической электромагнитной волны с синусоидальной морской поверхностью.

История вопроса

Известно, что плоская водная поверхность излучает тепловое поляризованное электромагнитное излучение. Согласно закону Кирхгофа, тепловое излучение поглощающей поверхности S в направлении $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$ пропорционально поглощенной энергии вспомогательной волны, падающей на поверхность S в направлении наблюдения $\mathbf{n}_{obs}(\theta, \varphi)$, противоположном направлению $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$: $\mathbf{n}_{obs}(\theta, \varphi) = -\mathbf{n}(\theta, \varphi)$. Здесь θ – угол места; φ – азимутальный угол наблюдения (рис. 1).

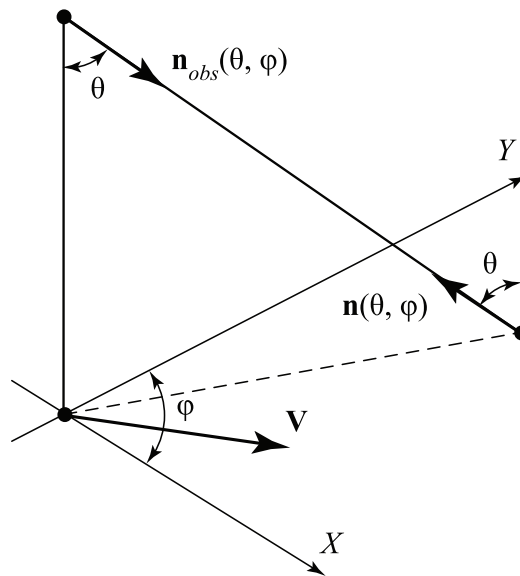


Рис. 1. Геометрия наблюдения: $\mathbf{n}_{obs}(\theta, \varphi)$ – единичный вектор направления наблюдения; $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$ – направление теплового микроволнового излучения; φ – азимутальный угол; \mathbf{V} – вектор ветра

В терминах яркостной температуры закон Кирхгофа приобретает следующий вид:

$$T_B(\theta, \varphi) = T\chi(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где $T_B(\theta, \varphi)$ – яркостная температура в направлении $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$; T – физическая температура водной поверхности; $\chi(\theta, \varphi)$ – коэффициент излучения поверхности, количественно равный относительной доли поглощенной энергии в направлении $\mathbf{n}_{obs}(\theta, \varphi)$.

В случае плоской поверхности S коэффициент излучения $\chi(\theta, \varphi)$ не зависит от азимутального угла φ и равен $1 - |R(\theta)|^2$, где $R(\theta)$ – коэффициент отражения Френеля. Таким образом, яркостная температура плоской поверхности имеет азимутальную симметрию:

$$T_B(\theta, \varphi) = T(1 - |R(\theta)|^2). \quad (2)$$

Коэффициенты отражения Френеля для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризаций отличаются друг от друга: $R_V(\theta) \neq R_H(\theta)$. Это приводит к неравенству яркостных температур $T_V(\theta) \neq T_H(\theta)$, и соответствует эллиптической поляризации. Исключение составляет наблюдение в надир $\theta = 0$, когда $R_V(0) = R_H(0)$, и азимутальная симметрия приводит к поляризационной симметрии: тепловое излучение при $\theta = 0$ становится неполяризованным.

В присутствии ветра тепловое излучение морской поверхности теряет азимутальную симметрию. Все поляризационные характеристики излучения морской поверхности (яркостная температура на разных поляризациях, форма поляризационного эллипса, компоненты вектора Стокса \mathbf{S} (Борн, Вольф, 1970)) приобретают теперь зависимость от азимутального угла φ . Кроме того, поляризационные характеристики зависят от скорости и направления приповерхностного ветра \mathbf{V} , так, скажем, для вектора Стокса:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(\theta, \varphi, \mathbf{V}). \quad (3)$$

При ветре даже при наблюдении в надир ($\theta = 0$) неполяризованное излучение становится эллиптически поляризованным, главные оси поляризационного эллипса ориентированы вдоль и поперек вектора ветра \mathbf{V} , а степень поляризации зависит от скорости ветра.

Разница между коэффициентами отражения Френеля для вертикальной R_V и горизонтальной R_H поляризаций на углах визирования, близких к надиру, невелика, и роль уклонов крупномасштабного волнения незначительна. Здесь превалирует механизм формирования поляризационных контрастов теплового излучения, связанный с мелкомасштабной рябью. Такой механизм был предсказан теоретически в работе (Кравцови др., 1978) и обнаружен экспериментально (Эткин и др., 1978). Это эффект связан с так называемыми «критическими явлениями» на мелкомасштабной шероховатой поверхности и имеет дифракционную природу.

Для больших углов визирования ($\theta \approx 50-60^\circ$) контрасты радиояркостной температуры, вызванные мелкомасштабной рябью и изменениями уклонов крупных волн, становятся сравнимыми. При наклонных измерениях изменения эллипса поляризации вызваны преимущественно крупномасштабными компонентами спектра ветрового волнения. Крупномасштабное волнение определяет локальный угол θ' между линией наблюдения

и локальной нормалью к поверхности моря (Stogryn, 1967). Приращение коэффициента излучения может быть рассчитано с использованием двухмерного распределения уклонов поверхности. Влияние крупномасштабного волнения на поляризационные характеристики теплового излучения морской поверхности анализировалось также в работе (Gasiewski, Kunkee, 1994).

Для описания взволнованной водной поверхности широко применяется двухмасштабная модель, в рамках которой водная поверхность представляется совокупностью мелко-масштабных волн («ряби») с длиной волны одного порядка с длиной электромагнитных волн и крупномасштабных неровностей с размерами, существенно превышающими длину электромагнитных волн. Расчеты методом геометрической оптики для крупных волн, проведенные более 30 лет назад, показали, что крупномасштабные неровности при известных из опыта уклонах ветровых волн не в состоянии обеспечить наблюдаемые в натурных измерениях величины радиояркостных контрастов.

Как уже отмечалось, тепловое радиоизлучение неровной водной поверхности в том случае, когда характерные размеры неровностей близки к длине волны излучения, обладает рядом специфических особенностей, называемых «критическими явлениями». В работе (Кравцов и др., 1978) анализировалось тепловое излучение водной поверхности с малыми периодическими неровностями синусоидальной формы в двумерном случае, т.е. профиль поверхности предполагался цилиндрическим и плоскость наблюдения совпадала с волновым вектором неровностей. На основании принципа Кирхгофа, обобщенного на случай стохастических (тепловых) полей (Левин и Рытов, 1967), задача излучения заменялась эквивалентной задачей исследования поглощения пробной электромагнитной волны, падающей на неровную поверхность. Для решения задачи дифракции использовался метод малых возмущений, причем расчет велся до величин второго порядка малости. Было обнаружено, что при некоторых критических условиях возникает резонансное увеличение коэффициента излучения поверхности. При этом, если на горизонтальной поляризации на резонансных длинах волн отмечаются относительно незначительные скачки излучательной способности, то на вертикальной поляризации отмечаются резкие и высокие пики в излучении.

Физический смысл критических условий заключается в том, что при их соблюдении один из дифракционных максимумов рассеянной электромагнитной волны направлен вдоль поверхности. При этом происходит увеличение поглощения энергии за счет ее передачи от свободной электромагнитной волны к связанной, имеющей вертикальную поляризацию. При излучении наблюдается, соответственно, обратный эффект – увеличение радиояркости в направлениях углов θ , определяемых соотношением длин поверхностной и электромагнитной волн, за счет резонансного обмена энергией со связанными волнами. Выяснилось, что в оптике подобный эффект известен уже более 100 лет под названием «аномалий Вуда» (Камоцкий, Назаров, 1998).

В дальнейшем теория явления была обобщена В.Г. Ирисовым (Ирисов, 1984) на случай произвольной поляризации волны и произвольной плоскости падения относительно волнового вектора неровностей (Гершензон и др., 1986).

Постановка задачи

Рассмотрим падающую электромагнитную волну произвольной линейной поляризации. Это предположение не нарушает общности поставленной задачи с учетом того, что любую эллиптическую поляризацию всегда можно разложить на две линейные и рассматривать каждую из них независимо. Электромагнитная волна падает на синусоидальную периодическую поверхность раздела двух сред (воздух-вода в нашем случае) вида $Z = a \sin \Lambda x$. Угол падения θ отсчитывается от надира; азимутальный угол φ – угол между осью X и плоскостью падения; поляризация падающей волны задается углом τ между плоскостью падения и вектором $\mathbf{E}^{(i)}$ (рис. 2).

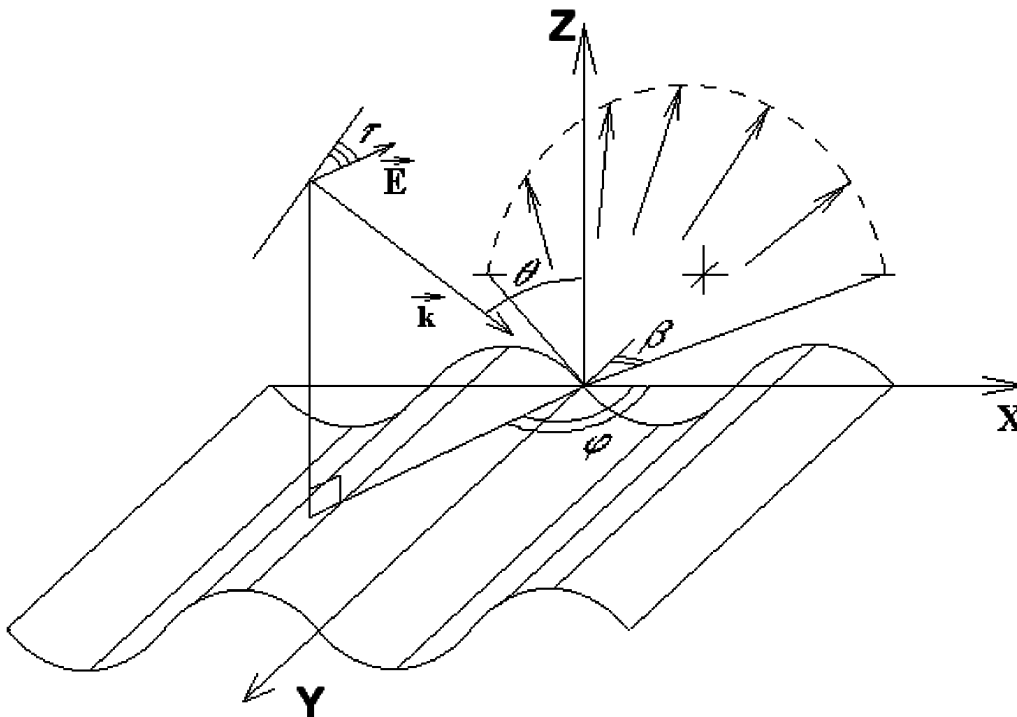


Рис. 2. Геометрия вспомогательной задачи о рассеянии пробной электромагнитной волны

Задача будет решена, если для произвольного угла падения волны удастся построить решения для полей как в воздухе (индекс 0), так и в среде (индекс 1), удовлетворяющие уравнениям Максвелла (Ландау, Лифшиц, 2001). Будем считать, что диэлектрическая проницаемость в воздухе равна единице. Для монохроматических полей эти уравнения переходят в уравнения Гельмгольца (Ландау, Лифшиц, 2001):

$$\Delta \mathbf{E}, \mathbf{H} + |k|^2 \mathbf{E}, \mathbf{H} = 0. \quad (4)$$

Уравнения должны удовлетворять граничным условиям, описывающим тангенциальные составляющие для магнитных и электрических полей:

$$H_{t_0} = H_{t_1} \quad (5)$$

$$E_{t_0} = E_{t_1}. \quad (6)$$

Будем искать решения в виде бесконечного ряда по волнам с эквидистантными волновыми векторами (Виноградова и др., 1979). Тогда для k_{x_n} получаем следующее выражение:

$$k_{x_n} = k_{0x} + n\Lambda, \quad (7)$$

где $n = 0; \pm 1; \pm 2; \dots, (n \in z)$ и k_{0x}, k_{x_n}, k_{y_0} одинаковы для падающей, отраженной и прошедшей волн, а $k_{z_n} = \sqrt{k_{0,1}^2 - k_{x_n}^2 - k_{y_0}^2}$, где $k_0 = \frac{\omega}{c}$, $k_1 = \sqrt{\varepsilon} \frac{\omega}{c}$.

Отметим тот факт, что совпадение k_{0x}, k_{x_n} и k_{y_0} для падающей, отраженной и прошедшей волн является существенным для дальнейшего решения. Если этого не потребовать, то граничные условия (5) и (6) не будут выполняться. Тогда поля для падающей, прошедшей и отраженной волн запишутся в виде бесконечных рядов по периоду модуляции границы. Для решения этой задачи будем использовать подход, основанный на разделении поляризации. Падающая волна разбивается на две группы полей:

$$E_y, H_x, H_z; \quad (8)$$

$$H_y, E_x, E_z. \quad (9)$$

Компоненты волны (8) и (9) переходят в горизонтальную и вертикальную поляризации соответственно при нормальном падении. При этом группа (8) возбуждает прошедшую и отраженную волну с теми же компонентами полей (8) и соответственно группа (9) определяет цуг волн с компонентами (9).

Следует отметить, что подобная терминология продиктована исключительно соображениями удобства и некоторой аналогии с формулами Френеля для плоской границы. Другими словами, нужно рассматривать дальнейшие выкладки как обобщение формул Френеля для синусоидальной границы и цуга волн. В дальнейшем будем именовать тройку компонент (8) горизонтальной поляризацией (Гор), а тройку (9) – вертикальной поляризацией (Вер).

При падении под произвольным углом для волны произвольной поляризации в среде возникают сразу две волны – вертикальной и горизонтальной поляризации. При этом E_y -компонента (в нашей геометрии) падающей волны (и, соответственно, H_x, H_z) возбуждают в среде E -волну (горизонтальную поляризацию), а H_y -компонента падающей волны (и, соответственно, E_x, E_z) возбуждают в среде H -волну (вертикальную поляризацию). В этом случае в среде распространяются обе волны, для которых коэффициенты разложения электромагнитных полей по плоским волнам B_n и C_n , которые будут определены ниже, существенно различны.

Расчет

Расчет проходит по следующей схеме. Сначала по известным компонентам (H_y, E_x, E_z) падающей волны находятся коэффициенты разложения для вертикальной поляризации. Затем по компонентам (E_y, H_x, H_z) падающей волны находятся коэффициенты B_n и C_n для го-

ризонтовой поляризации. Суммарные поля E и H находятся векторным сложением. Подробные выкладки приведены в (Селунский и др. 2013).

Для вертикальной поляризации получим:

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_n \left\{ \frac{k_{0z_n}}{k_0} - \frac{k_{0x_n}}{k_0} (\Lambda) \frac{p-n}{(k_{0z_n} + k_{0z})} \right\} J_{p-n} \left[(k_{0z_n} + k_{0z}) a \right] + \\
& + \sum C_n \left\{ \frac{k_{1z_n}}{k_0 \varepsilon} + \frac{k_{0x_n}}{k_0 \varepsilon} (\Lambda) \frac{p-n}{(k_{0z} - k_{1z_n})} \right\} J_{p-n} \left[(k_{0z} - k_{1z_n}) a \right] = \\
& = A_0 \left[\frac{k_{0z}}{k_0} \delta_{0,p} + \frac{k_{0x}}{k_0} \frac{(a\Lambda)}{2} (\delta_{1p} + \delta_{-1p}) \right], \\
& \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n J_{p-n} \left[(k_{0z} + k_{0z_n}) a \right] - \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n J_{p-n} \left[(k_{0z} - k_{1z_n}) a \right] = -A_0 \delta_{0p}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Для горизонтальной поляризации соответственно получим:

$$\begin{aligned}
& H_{0x} \delta_{0p} + \frac{H_{0z} a \Lambda}{2} (\delta_{p,1} + \delta_{p,-1}) = \\
& = \sum_n B_n \left(\frac{k_{0n_z}}{k_0} - \frac{k_{0n_x}}{k_0} \frac{\Lambda(p-n)}{k_{0z} + k_{0n_z}} \right) J_{p-n} \left(a(k_{0n_z} + k_{0z}) \right) + \\
& + \sum C_n \left(\frac{k_{1n_z}}{k_0} + \frac{k_{1n_x}}{k_0} \frac{\Lambda(p-n)}{k_{0z} - k_{1n_z}} \right) J_{p-n} \left(a(k_{0z} - k_{1n_z}) \right), \\
& E_{0y} \delta_{0,p} = - \sum_n B_n J_{p-n} \left(a(k_{0n_z} + k_{0z}) \right) + \sum_n C_n J_{p-n} \left(a(k_{0z} - k_{1n_z}) \right),
\end{aligned} \tag{11}$$

где $p = 0, \pm 1, \dots, \pm \infty$. Коэффициенты отражения R и излучения χ определяются по известным соотношениям (Ландау, Лифшиц, 2001):

$$\begin{aligned}
|R|^2 &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{k_{0z_n}}{k_{0z_{пад}}} |B_n|^2, \\
|\chi|^2 &= 1 - |R|^2.
\end{aligned} \tag{12}$$

Результаты численного расчета

В этом разделе приводятся результаты численного расчета зависимости поведения амплитуд отраженных и поглощающихся средой волн, полученных из решения систем уравнений (10) и (11). На графиках *рис. 3–5* приведены амплитуды коэффициента B_i нулевого

и первого порядка для отраженных волн от синусоидальной водной границы. При этом значения углов в точках локальных экстремумов точно совпадают с расчетами по кинематической теории (Гершензон и др., 1986):

$$\sin \theta = \pm 1 - \frac{n\Lambda}{k_0}, \quad (13)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2$.

Для отраженной амплитуды B_0 (зеркальное отражение) хорошо видно движение минимума от 0° (синяя линия, $\Lambda = 8$ мм) к $11,5^\circ$ (зеленая линия, $\Lambda = 10$ мм), $19,5^\circ$ (красная линия, $\Lambda = 12$ мм) и до $47,2^\circ$ (коричневая линия, $\Lambda = 30$ мм).

На рис. 6 представлен суммарный коэффициент отражения $|R|^2$ от угла визирования для электромагнитной волны на вертикальной поляризации $\lambda = 8$ мм и поверхностных волн с амплитудой $a = 0,7$ мм и с длиной волны Λ от 8 до 32 мм, который демонстрирует эффект «критических явлений». На основании закона Кирхгофа (2) минимумы в показателе отражения указывают на наличие максимумов радиояркостной температуры при радиометрическом наблюдении. «Критические» углы визирования соответствуют формуле (13).

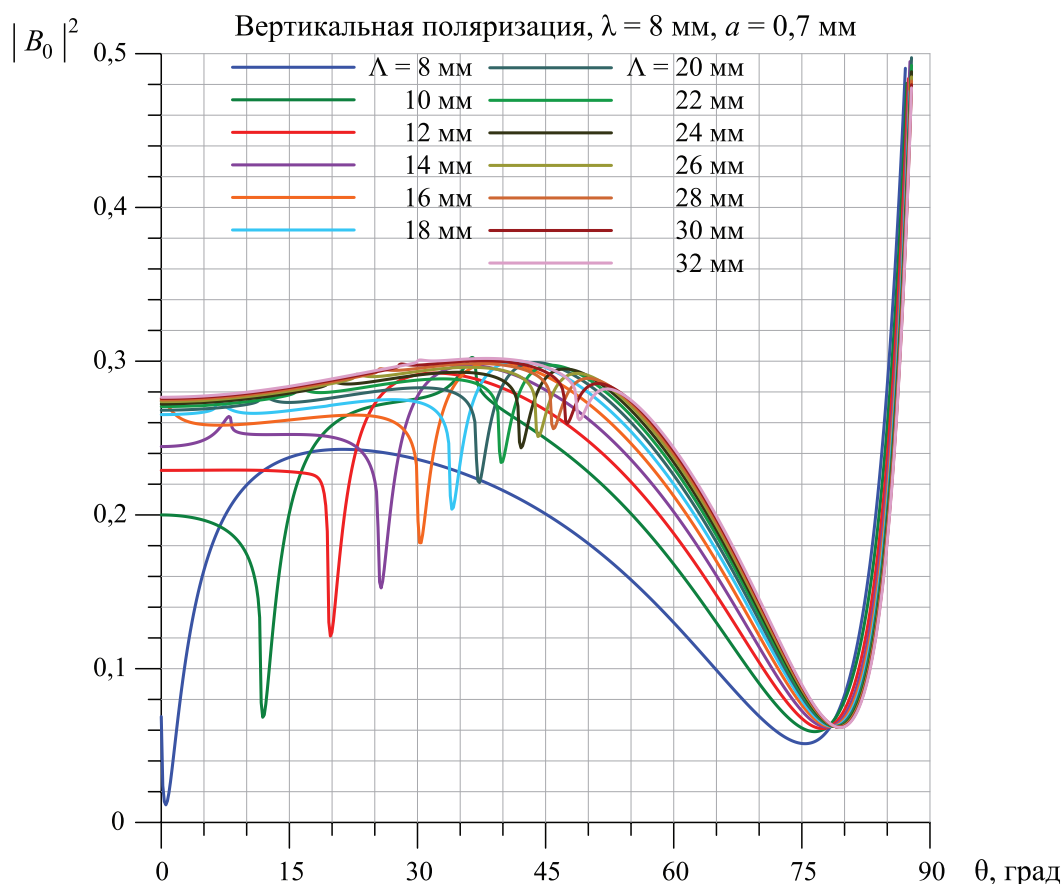


Рис. 3. Зависимость члена B_0 от угла визирования для электромагнитной волны на вертикальной поляризации $\lambda = 8$ мм и поверхностных волн с амплитудой $a = 0,7$ мм и длиной волны Λ от 8 до 32 мм

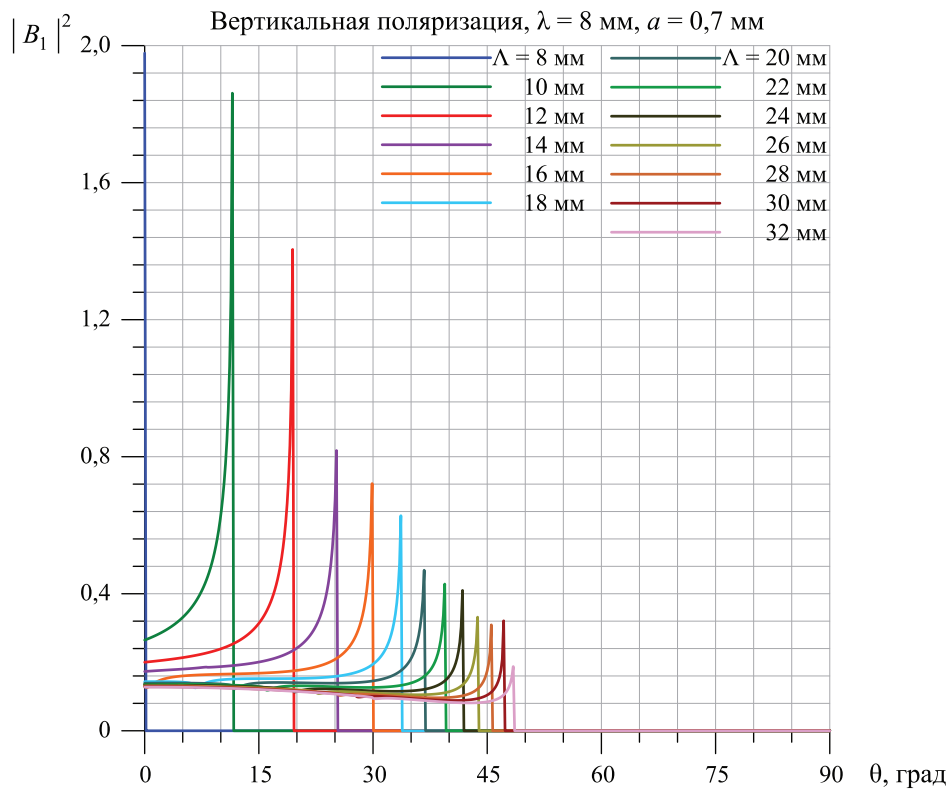


Рис. 4. Зависимость члена B_1 от угла визирования для электромагнитной волны на вертикальной поляризации $\lambda = 8$ мм и поверхностных волн с амплитудой $a = 0,7$ мм и длиной волны Λ от 8 до 32 мм

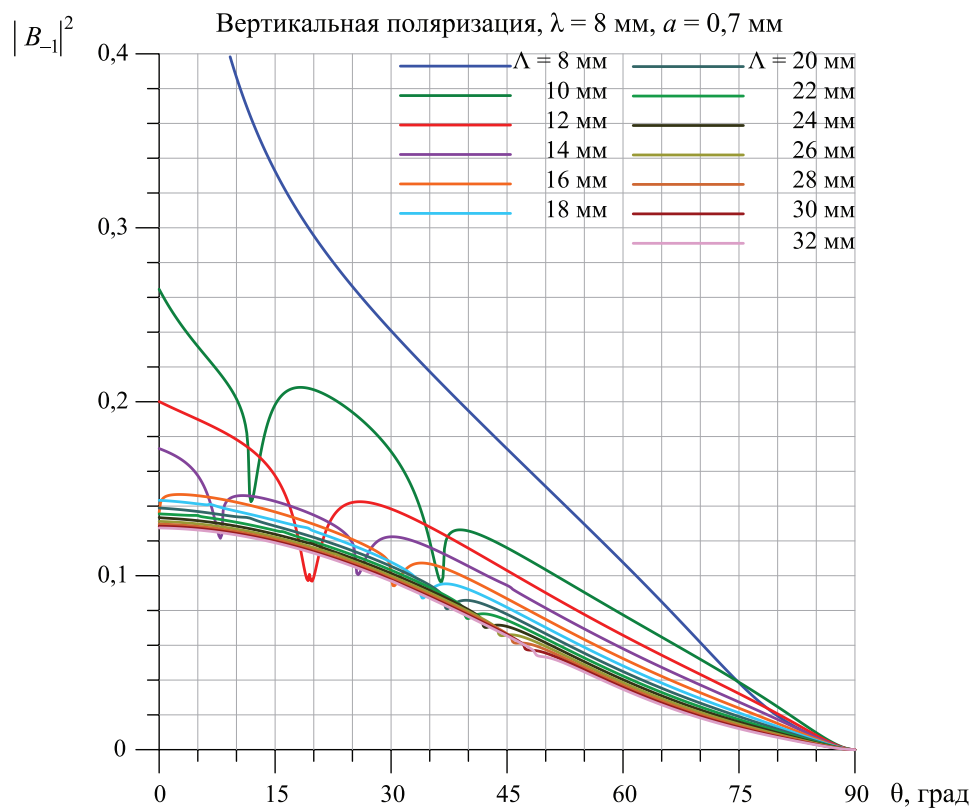


Рис. 5. Зависимость члена B_{-1} от угла визирования для электромагнитной волны на вертикальной поляризации $\lambda = 8$ мм и поверхностных волн с амплитудой $a = 0,7$ мм и длиной волны Λ от 8 до 32 мм

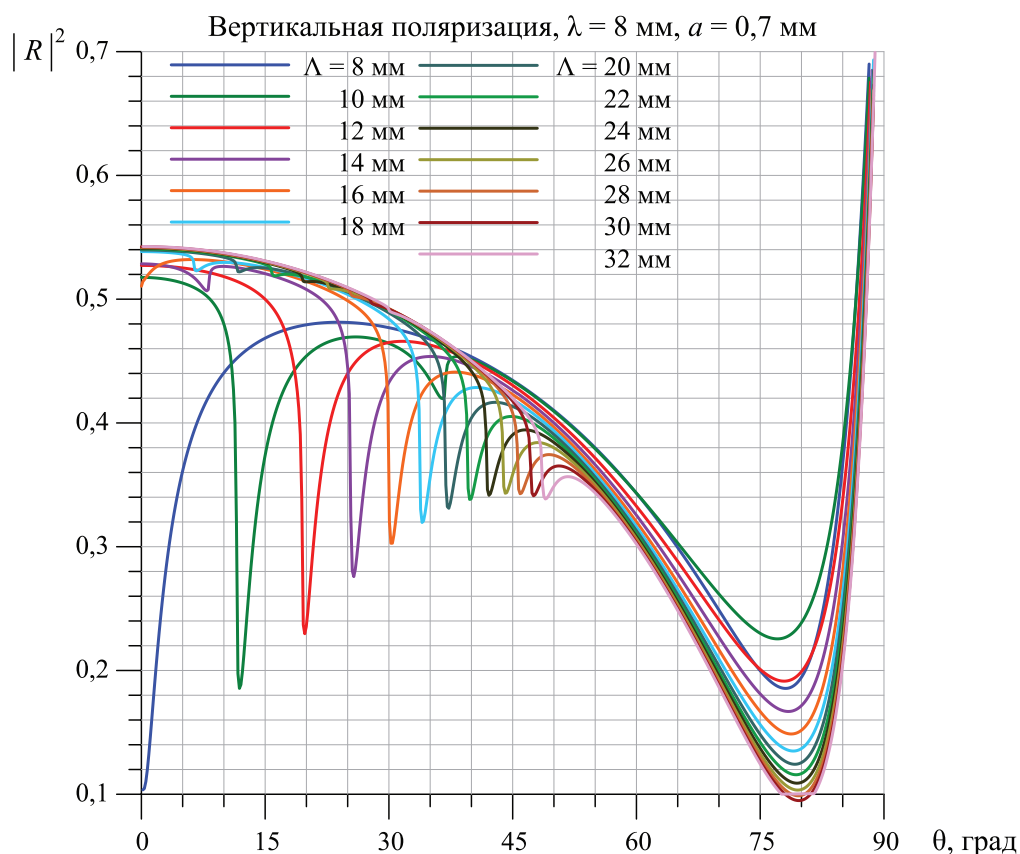


Рис. 6. Зависимость квадрата коэффициента отражения $|R|^2$ от угла визирования для электромагнитной волны на вертикальной поляризации $\lambda = 8$ мм и поверхностных волн с амплитудой $a = 0,7$ мм и длиной волны Λ от 8 до 32 мм

Обсуждение результатов

Эффект «критических явлений», изучению которого в ИКИ РАН было посвящено много работ, все еще вызывает большие споры. До сих пор не существует единого объяснения появления экстремумов, возникающих при «критических» углах падения (13). Ясно только, что при этих углах перестают существовать отраженные волны 1-го, 2-го или 3-го порядка в дифракционной задаче. И, соответственно, возникают новые порядки волн излучения в излучательной задаче. Это приводит к минимумам в отражательной способности и, следовательно, к максимумам в излучательной способности.

Кроме того, чрезвычайно интересной темой в исследуемой модели является обсуждение гипотезы Рэлея. Согласно гипотезе Рэлея, волновое поле должно существовать вплоть до границы среды. Если для достаточно гладких границ это имеет место быть с хорошей степенью точности, то для границ, неровности которых сравнимы с длиной волны, это может не выполняться совсем. Здесь следует остановиться подробнее на тех условиях, в которых рассматриваемая модель работает. Ни для кого не секрет, что при достаточно «крутых» амплитудах синуса возникает проблема существования поля вблизи границы раздела вода – воздух в виде плоской волны. Если принять плосковолновую модель за основу, мы

получим в ближней зоне некорректную картину – рост амплитуд затухающих волн на границе. Это объясняется тем фактом, что плоская волна не является физически реальной и переносит в себе бесконечную энергию. Поэтому в ближней зоне плосковолновая модель работает плохо, что иллюстрируют графики для амплитуд проходящих волн.

Заключение

В работе развивается теория взаимодействия плоско-поляризованной монохроматической электромагнитной волны с синусоидальной морской поверхностью. Получено точное решение волнового уравнения на синусоидальной границе вода – воздух для произвольной поляризации. Граничные условия на периодической поверхности разлагаются в ряды Фурье по пространственным гармоникам. После чего приравняются коэффициенты при одинаковых экспонентах. Это приводит к бесконечномерной системе линейных уравнений, которая решается с любой выбранной степенью точности в силу ее диагональной сходимости. Впервые для периодических сред развит математический аппарат, позволяющий сводить расчет дифракции произвольно поляризованной плоской волны к системе линейных алгебраических уравнений.

На основе полученного решения проведены расчеты коэффициента поглощения и излучения и радиояркостной температуры морской поверхности от различных параметров. Показаны резонансные особенности в коэффициентах излучения и поглощения. Максимальные эффекты связаны, как это и ожидалось, с вертикальной поляризацией излучения.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979, 386 с.
3. Гершензон В.Е., Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Исследование резонансных эффектов в радиотепловом излучении водной поверхности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 4. С. 379–384.
4. Ирисов В.Г. Исследования излучения электромагнитных волн периодически неровной поверхности: Препринт. Пр-944. М.: ИКИ АН СССР, 1984. 18 с.
5. Камоцкий И.В., Назаров С.А. Аномалии Вуда и поверхностные волны в задаче рассеяния на периодической границе. 1 // Математический сборник. 1998. Т. 190. № 1. С. 109–138.
6. Кравцов Ю.А., Мировская Е.А., Попов Е.А., Троицкий И.А., Эткин В.С. Критические явления при тепловом излучении периодически неровной водной поверхности // Известия АН СССР. Физика океана и атмосферы. 1978. Т. 14. № 7. С. 733–739.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2001. 651 с.
8. Левин М.Л., Рытов С.М. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. М.: Наука, 1967.
9. Селунский А.Б., Кузьмин А.В., Комарова Н.Ю. Тепловое поглощение плоской электромагнитной волны произвольной поляризации на синусоидальной границе водной поверхности. Препринт. М.: ИКИ РАН, 2013. Пр-2171.
10. Эткин В.С., Ворсин Н.Н., Кравцов Ю.А., Мировский В.Г., Никитин В.В., Попов А.Е., Троицкий И.А. Обнаружение критических явлений при тепловом радиоизлучении периодически неровной водной поверхности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 3. С. 454–456.
11. Gasieviski A.J., Kunkee D.B. Polarized microwave emission from water waves // Radio Science. 1994. Vol. 29. No. 6. P. 1449–1466.
12. Stogryn A. The apparent temperature of the sea at microwave frequencies // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1967. Vol. AP-15. No. 2. P. 278–286.

Emission of a plane electromagnetic wave of arbitrary polarization on sinusoidal boundary water surface

A.B. Selunsky, A.V. Kuzmin, N.Yu. Komarova

Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia
E-mail: alexendersel@mail.ru

Remote aerospace methods now play a decisive role in the studies of the oceans. Microwave radiometer measurements, in turn, occupy a leading position in ocean remote sensing. Using microwave radiometry allow determining such important parameters of the ocean – atmosphere system as sea surface temperature, speed and direction of the surface wind, integral parameters of humidity and water vapor content in the atmosphere, etc. In recent years, considerable efforts have been devoted to developing methods to determine salinity of the surface layer of ocean. All this requires close study of the physical mechanisms of polarization characteristics of microwave ocean emission and atmospheric radiation scattered by rough surface.

We develop a theory of interaction of plane-polarized monochromatic electromagnetic wave with a sinusoidal surface of the sea. An exact solution of the wave equation for a sinusoidal water-air boundary for an arbitrary polarization is obtained. Boundary conditions on a periodic surface are expanded in Fourier series of spatial harmonics. This leads to an infinite-dimensional system of linear equations, which is solved with any chosen degree of accuracy due to its diagonal convergence. On the basis of the solution, sea surface absorption coefficient, emissivity and brightness temperature are calculated for various parameter sets. Resonant features of the emissivity and absorption coefficient are demonstrated. As expected, the maximal effects are associated with vertically polarized radiation.

Keywords: remote sensing, microwave radiometer, radiometers, theory of electromagnetic scattering, absorption coefficient, emissivity, critical phenomena, wave diffraction, surface, border

References

1. Born M., Wolf E., *Osnovy optiki* (Principles of Optics), Moscow: Nauka, 1970, 855 p.
2. Vinogradova M.B., Rudenko O.B., Sukhorukov A.P. *Teoriya Voln* (Wave Theory), Moscow: Nauka, 1979, 386 p.
3. Gershenson V.E., Irisov V.G., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., *Issledovanie rezonansnykh effektov v radioteplovom izlucheniі vodnoi poverkhnosti* (Investigation resonance effects in radio thermal radiation of water surface), *Izvestiya vuzov, Radiofizika*, 1986, Vol. 29, No. 4, pp. 379–384.
4. Irisov V.G., *Issledovaniya izlucheniya elektromagnitnykh voln periodicheskii nerovnoi poverkhnosti, Preprint, Pr-944* (Studies of radiation of electromagnetic waves at periodically rough surface, Preprint, Pr-944), Moscow: IKI AN SSSR, 1984, 18 p.
5. Kamotskii I.V., Nazarov S.A., *Anomalii Vuda i poverkhnostnye volny v zadache rasseyaniya na periodicheskoi granitse. 1* (Wood's anomalies and surface waves in the problem of scattering by a periodic boundary), *Matematicheskii sbornik*, 1998, Vol. 190, No. 1, pp. 109–138.
6. Kravtsov Yu.A., Mirovskaya E.A., Popov E.A., Troitskii I.A., Etkin V.S., *Kriticheskie yavleniya pri teplovom izlucheniі periodicheskii nerovnoi vodnoi poverkhnosti* (Critical phenomena in thermal emission by periodically rough water surface), *Izvestiya AN SSSR. Fizika okeana i atmosfery*, 1978, Vol. 14, No. 7, pp. 733–739.
7. Landau L.D., Lifshits E.M., *Teoreticheskaya fizika, Tom 8: Elektrodinamika sploshnykh sred* (Theoretical physics, Vol. 8: Electrodynamics of Continuous Media), Moscow: Fizmatlit, 2001, 651 p.
8. Levin M.L., Rytov S.M., *Teoriya ravnovesnykh teplovykh fluktuatsii v elektrodinamike* (The theory of equilibrium thermal fluctuations in electrodynamics), Moscow: Nauka, 1967.
9. Selunsky A.B., Kuzmin A.V., Komarova N.Yu. *Teplovoe pogloschenie ploskoi electromagnitnoi volny proizvol'noi polarizatsii na sinusoidal'noi granice vodnoi poverkhnosti, Preprint, Pr-2171* (Thermal absorption of a plane electromagnetic wave of arbitrary polarization on sinusoidal boundary water surface, Preprint, Pr-2171), Moscow: IKI RAN, 2013.
10. Etkin V.S., Vorsin N.N., Kravtsov Yu.A., Mirovskii V.G., Nikitin V.V., Popov A.E., Troitskii I.A. *Obnaruzhenie kriticheskikh yavlenii pri teplovom radioizlucheniі periodicheskii nerovnoi vodnoi poverkhnosti* (The discovery of critical phenomena in the thermal radiation periodically rough water surface), *Izvestiua VUZov. Radiofizika*, 1978, Vol. 21, No. 3, pp. 454–456.
11. Gasiévski A.J., Kunkee D.B., Polarized microwave emission from water waves, *Radio Science*, 1994, Vol. 29, No. 6, pp. 1449–1466.
12. Stogryn A., The apparent temperature of the sea at microwave frequencies, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1967, Vol. AP-15, No. 2, pp. 278–286.